



ANÁLISIS DE LA EROSIÓN POTENCIAL Y EFECTIVA DEL SUELO POR MEDIO DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO “USLE” EN EL ÁREA DE JURISDICCIÓN DE LA CAR

Analysis of potential and effective soil erosion using the Universal Soil Loss Equation "USLE" in the CAR's area of jurisdiction.

Juliana Alejandra Guzmán Cañón
Código: 3101545
Ingeniera Ambiental y Sanitaria

Director:
Ing. Freddy León Reyes M.Ed

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA
JUNIO DE 2021
BOGOTÁ-COLOMBIA**

ANÁLISIS DE LA EROSIÓN POTENCIAL Y EFECTIVA DEL SUELO POR MEDIO DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO "USLE" EN EL ÁREA DE JURISDICCIÓN DE LA CAR

ANALYSIS OF POTENTIAL AND EFFECTIVE SOIL EROSION USING THE UNIVERSAL SOIL LOSS EQUATION "USLE" IN THE CAR'S AREA OF JURISDICTION.

Juliana Alejandra Guzmán Cañón ¹

¹Ingeniera ambiental y Sanitaria, estudiante de especialización en ingeniería geomática

Universidad Militar Nueva Granada

Bogotá, Colombia

est.juliana.guzman@unimilitar.edu.co

RESUMEN

El artículo tiene como objetivo principal analizar la erosión potencial y efectiva del suelo por medio de la ecuación universal de pérdida de suelo "USLE" en el área de jurisdicción de la CAR. Para el desarrollo de la metodología se analizaron cada uno de los factores de la ecuación por medio del software de ArcMap 10.7. El factor R se evaluó por medio del método de Hudson adaptado por Rivera y Gómez, se calculó primero el IMF por el método de Arnoldus, después de haber generado las superficies de precipitación por el método geoestadístico de Kriging para los años 2013 a 2018, el factor K se calculó por medio del método de Williams, el factor LS utilizó un DEM para obtener las pendientes del terreno y por medio de los métodos propuestos por Dissmeyer - Foster, Desmet - Gover adaptada por Velásquez y McCool se calculó el factor y el factor C se obtuvo por el método de Wischmeier y Smith. Finalmente, la erosión potencial del suelo clasificada como alta ocupa el 4.03% del área dentro del rango de 5.500 a 83.092 tm/ha*año, mientras que la erosión efectiva solo el 2.59% tiene pérdida de suelos entre 5.500 a 49.912 tm/ha* año.

Palabras clave: Ecuación USLE, suelos, kriging, erosión potencial, erosión efectiva.

ABSTRACT

The main objective of this article is to analyze the potential and effective soil erosion by means of the universal soil loss equation "USLE" in the area under the jurisdiction of the CAR. For the development of the methodology, each of the factors of the equation were analyzed by means of ArcMap 10.7 software. The R factor was evaluated by means of the Hudson method adapted by Rivera and Gómez, the IMF was first calculated by the Arnoldus method, after having generated the precipitation surfaces by the Kriging geostatistical method for the years 2013 to 2018, the K factor was calculated by the Williams method, the LS factor used a DEM to obtain the slopes of the terrain and by means of the methods proposed by Dissmeyer - Foster, Desmet - Gover adapted by Velasquez and McCool the factor was calculated and

the C factor was obtained by the Wischmeier and Smith method. Finally, potential soil erosion classified as high occupies 4.03% of the area within the range of 5,500 to 83,092 tm/ha*year, while effective erosion only 2.59% has soil loss between 5,500 to 49,912 tm/ha*year.

Key words: USLE equation, soils, kriging, potential erosion, effective erosion.

INTRODUCCIÓN:

Perdida de los suelos:

La erosión o pérdida físico-mecánica del suelo es la disminución de la oferta de los servicios ecosistémicos y ambientales ofrecidos por el recurso debido a la remoción del material superficial por efecto de agentes erosivos dinámicos como la precipitación, la escorrentía, desastres naturales como inundaciones (Prado Wildner & Veiga, 2006) y o por intervención humana. La probabilidad de erosión se puede incrementar o disminuir, teniendo en cuenta factores de tipo físico, químico, biológico y o antrópico (IDEAM, 2015) de la zona.

De acuerdo con los factores descritos, los físicos son aquellos relacionados con la compactación de los suelos, eventos de sequía, desertificación y topografía del terreno. Los factores químicos son cambios en el estado químico del suelo por cambios en el pH, pérdida de nutrientes, contaminación por sustancias químicas (IDEAM, 2015). Respecto a las causas biológicas se refiere a las coberturas del suelo y finalmente los factores antrópicos influyen en los procesos de deforestación, quema de cobertura vegetal y conflictos de uso del suelo.

Los eventos de precipitación en el territorio colombiano tienen menor o mayor frecuencia de presentarse dependiendo tanto de la región del país, como de la variabilidad climática, la cual se define como las estaciones, los periodos de repetición anual y los periodos de repetición por décadas (UNGRD, 2017). Los efectos de este fenómeno natural pueden desencadenar desastres o catástrofes naturales a corto plazo, pero a largo plazo. Es importante conocer sus efectos y mitigar eventos como lo es la pérdida de los suelos para evitar afectar diferentes aspectos de una región o incluso del país.

De acuerdo con el atlas de riesgo de la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo - UNGDR la erosión de los suelos va a ser una causa o un efecto de algunas de las amenazas relacionadas con la región andina como: las inundaciones, las sequías las cuales pueden ser de tipo meteorológico, hidrológico, agrícola o socioeconómico y por ultimo los movimientos en masa (UNGRD, 2018).

Ecuación de pérdida de suelo-USLE:

El cálculo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos- USLE se aplica en estudios relacionados al cambio forestal o a las áreas protegidas, debido a que son áreas muy sensibles y requieren de un constante seguimiento para evitar impactos negativos sobre los servicios brindados a nivel ecosistémico, tanto ecológicos, como ambientales relacionados con las actividades económicas.

La USLE también puede manejarse para evaluar la erosión hídrica existente en los suelos de las cuencas hidrográficas. Para su cálculo necesario contar con los insumos necesarios para el cálculo de los factores relacionados en la ecuación. Estos corresponden a la erosividad de la lluvia, erosionabilidad del suelo, longitud de la ladera, pendientes, cubierta vegetal y prácticas de manejo.

Para determinar el factor R o erosividad de la lluvia es necesario el manejo de modelos probabilísticos para determinar una superficie continua con los datos discretos de precipitación (Murillo et al., 2012). Usualmente se utilizan modelos probabilísticos tales como Inverse Distance Weighted-IDW o Kriging para estudios hidrológicos o geológicos debido a su asertividad (Chirinos & Mallaqui, 2016; Neira Acosta & Alba Ostos, 2015).

Los modelos geoestadísticos se pueden generar a partir del software de ArcGIS por medio de la herramienta de geostatistical analyst. Desde allí se pueden modificar los parámetros para seleccionar el modelo probabilístico más acertado. El modelo de IDW es un método matemático el cual interpola los datos existentes por medio de la función inversa de la distancia entre los datos más cercanos (Murillo et al., 2012). Es una metodología determinista y se utiliza cuando los datos están separados de forma uniforme (GIS Geography, 2020).

Por otro lado, Kriging además de realizar predicciones de probabilidad interpola los datos para asignar valores a áreas sin información. Los datos deben tener distribución normal, ser estacionarios y no tener ninguna tendencia (GIS Geography, 2021). Para el análisis exploratorio de los datos se pueden hacer por medio del semivariograma, el qqplot y el histograma.

La información obtenida por medio del modelo probabilístico se debe analizar con el diagrama de voronoi. Este corresponde a al método de isoyetas manejado para eventos de precipitación. Este método predictivo se basa en polígonos generados a partir de cada estación con la información proporcionada mensualmente.

Respecto al cálculo de los demás factores de la ecuación, se deben tener en cuenta las ecuaciones y los mejores modelos, teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas y ambientales tales como la topografía del terreno, los tipos de coberturas o ecosistemas de la región y contar con los insumos necesarios para el cálculo de cada uno de estos.

En cuanto a los resultados obtenidos para cada factor se analizaron de acuerdo con los rangos asignados para cada uno. De la multiplicación de los valores obtenidos para los factores activos: erosividad de la lluvia, erosionabilidad del suelo, longitud de la ladera y pendiente se obtiene la erosión potencial. Por otro lado, la erosión efectiva es cuando se tienen en cuenta los factores activos y los factores atemperantes, los cuales corresponden al factor de cubierta vegetal y a las prácticas de manejo (Ramírez-Ortiz et al., 2007).

Área de estudio:

Actualmente son 104 municipios dentro de la jurisdicción de la CAR de los cuales 98 son del departamento de Cundinamarca y 6 de Boyacá. En total son 9 cuencas primarias, donde se encuentran los ríos: Bogotá, Negro, Sumapaz, Magdalena, Ubaté-Suárez, Minero, Machetá, Blanco y Gachetá (CAR, 2020).

Es importante conocer las características de esta área con el fin de considerar las zonas más vulnerables frente a la pérdida de suelos, porque además de la alta densidad poblacional aproximadamente de 10 millones de habitantes, no solo el desabastecimiento hídrico, disminuyendo la oferta del recurso para tener acceso a los servicios básicos sería un inconveniente como efecto de la erosión de los suelos, sino también la afectación de la economía de las diferentes regiones.

De acuerdo con la normativa vigente frente a la regulación del recurso en el año 2016 se promovió la política para la gestión integral de los suelos (Política Para La Gestión Sostenible Del Suelo, 2016) a nivel nacional donde se expuso la necesidad de tomar medidas frente a la conservación, restauración y fortalecimiento de los suelos.

Teniendo en cuenta la política nacional, el presente artículo tiene como finalidad identificar y priorizar las áreas más vulnerables dentro del área de jurisdicción donde la erosión potencial y efectiva es más alta de acuerdo con los factores de la ecuación USLE analizados. Por medio de este se pueden desarrollar investigaciones específicamente para las regiones o municipios con mayor pérdida de suelos, con el fin de formular estrategias de conservación del recurso por medio de políticas, planes, programas y proyectos

1. MATERIALES Y MÉTODOS

En el desarrollo del presente artículo se va a cuantificar la pérdida de los suelos debido a la erosión hídrica haciendo uso de la ecuación USLE (ecuación 1). Cada uno de los factores de la ecuación corresponden a una serie de análisis de datos obtenidos para el área de estudio con el fin de valorar numéricamente las zonas más vulnerables.

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \text{ Ecuación 1}$$

A: Pérdida de suelo (tm/ha * año)

R: Factor erosividad de la lluvia (MJ * mm/ha * año)

K: Factor erosionabilidad del suelo (tm * ha * h/ha * MJ * mm)

L: Factor longitud del terreno

S: Factor pendiente del terreno

C: Factor cobertura

P: Factor prácticas de conservación

Fuente: (Rodriguez et al., 2004)

Para el cálculo de cada uno de los factores, se utilizaron los insumos necesarios tales como datos de precipitación mensual multianual, datos de cartografía básica, imágenes satelitales para la obtención del modelo de elevación digital-DEM, usos actuales del suelo y datos sobre los suelos reportados por la FAO.

Factor R: erosividad de la lluvia:

Corresponde a la erosividad de la lluvia o la energía generada por la precipitación de una zona donde se puede llegar a erosionar el suelo. Se tuvieron en cuenta los datos de precipitación mensual multianual entre los años 2013 a 2018. Se seleccionaron en total 106 estaciones meteorológicas. Del total de las estaciones, 96 se encuentran dentro de los municipios de Cundinamarca, 4 están en la ciudad de Bogotá, 5 están en los municipios de Boyacá y 1 está en el municipio de Santander.

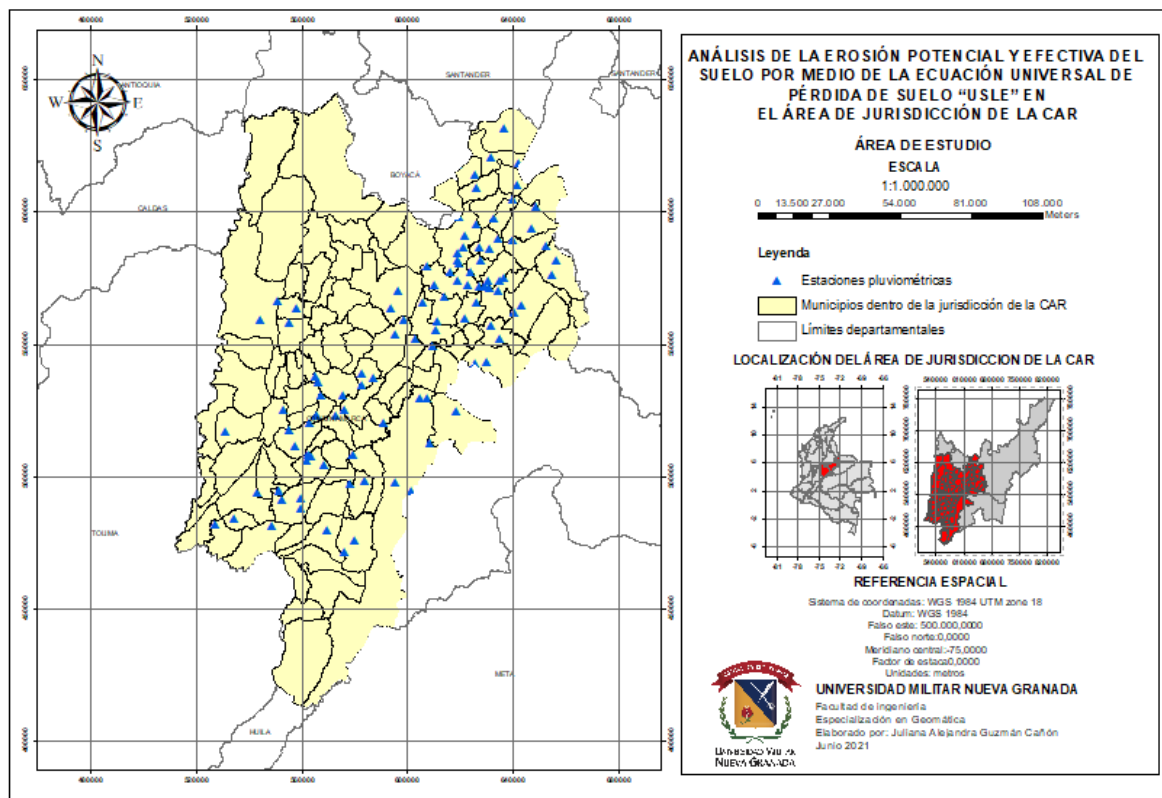


Imagen 1: Localización área de estudio y estaciones meteorológicas.

Para determinar la calidad de los datos antes de utilizar el método de interpolación de Kriging se realizó un análisis exploratorio donde se observó el tipo de distribución de los datos por medio del histograma y las estadísticas como el skewness, la curtosis y el promedio entre los valores de la media y la mediana el cual debe ser cercano a 1 y el error de la media cuadrática menor a 50 mm.

Tal y como se ve en la imagen 1 las estaciones se encuentran ubicadas hacia la parte central de área de estudio. Debido a lo anterior se configuro el método de interpolación teniendo como modelo los mapas de voronoi en cada mes, para

acomodar mejor los valores de las estaciones cercanas y de esta manera obtener la predicción más acertada, por medio del modelo geoestadístico.

Además, se analizó la presencia de datos extremos con el fin de no considerarlos para evitar resultados con rangos muy amplios; sin embargo, en algunos casos no se omitieron debido a las zonas donde había pocas estaciones y debieron ser utilizados.

Por medio de la herramienta de geostatistical analyst se analizaron los posibles modelos de predicción de Kriging para cada uno de los años y meses según la tendencia de los datos. Para mejorar la predicción y optimizar el modelo se utilizó la variable de semivariograma.

Una vez se cuenta con todas las superficies de predicción para cada uno de los años se realizó el cálculo del Índice Modificado de Fournier-IMF para cada uno de los años. Este índice fue planteado por Arnoldus en 1978 (Benayas Polo, 2019) el cual se calcula por medio de la ecuación 2. El índice caracteriza la agresividad de la precipitación no solo con respecto al mes con mayor precipitación como lo hace el índice de Fournier sin corrección, también tiene en cuenta la precipitación de todos los meses.

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{p_t} \text{ Ecuación 2}$$

Fuente:(Benayas Polo, 2019)

P_i es la precipitación para cada mes medido en mm y p_t corresponde a la precipitación media anual siendo la suma de las superficies generadas con Kriging de todos los meses. Teniendo la superficie para el IMF se puede generar la superficie con los valores correspondientes al factor R o EI30, siendo la energía cinética de la precipitación multiplicada por la intensidad de la lluvia durante 30 minutos.

Al obtener el raster del IMF para cada uno de los años desde 2013 a 2018, se promediaron las superficies con el fin de tener solo una superficie raster para calcular el factor R por medio de la ecuación 3. Este índice se puede evaluar de acuerdo con una clasificación dada por la Comisión Europea de Comunidades-CEC (Echeverri Tafur & Obando Moncayo, 2010) para el análisis del riesgo de la erosión del suelo (tabla 2).

El cálculo y el análisis factor R va a depender de la ubicación geográfica del terreno y del régimen pluvial de la zona. Para el cálculo de este factor fue necesario contar con una ecuación de linealización. Esta sale a partir de los datos de precipitación diaria cada 30 minutos por un extenso periodo multianual. Como los datos usados para este artículo fueron de precipitación media mensual, se utilizó la ecuación obtenida de un estudio realizado en el eje cafetero propuesta por Rivera y Gómez, quienes adaptaron el método de Hudson (Lince Salazar et al., 2016; Ramírez-Ortiz et al., 2007).

$$R = \sum_{1}^{12} 38.4 \times IMF + 28.3 \text{ Ecuación 3}$$

Fuente: (Ramírez-Ortiz et al., 2007)

Las unidades utilizadas en el factor R fueron de energía cinética dada por la precipitación, por unidad de área, refiriéndose al área en donde ocurre la precipitación y esto en función del tiempo de duración del evento (MJ* cm/ ha*año).

En cuanto al análisis del factor de R se utilizó la clasificación dada por Rivera y Gómez, la cual fue propuesta para investigaciones desarrolladas en el eje Cafetero. Esta clasificación tuvo en cuenta 8 clases de las cuales fueron clasificadas desde una erosividad natural hasta una extremadamente severa (tabla 3).

Factor K: Erosionabilidad del suelo:

El factor de la erosionabilidad del suelo (K), se calculó a partir de la información de clasificación de los suelos disponible en la página de la FAO, donde se encuentra el archivo shapefile con la información de los tipos y características de los suelos.

Dentro de los atributos de la capa se encuentran los porcentajes de limo, arena, arcilla y materia orgánica, datos necesarios para el cálculo del factor K haciendo uso de la ecuación 4, la cual corresponde a la fórmula de Williams:

$$K = 0.1317 * f_{csand} * f_{ci-si} * f_{org} * f_{hisand} \text{ Ecuación 4}$$

Fuente:(Copernicus, 2019)

Cada uno de los parámetros de la formula se refiere a los porcentajes. El primer parámetro se refiere al porcentaje de arena respecto al contenido de limo (Ecuación 5), el segundo corresponde al porcentaje de arcilla menos el contenido de limo (Ecuación 6), el tercero corresponde a la cantidad de materia orgánica (Ecuación 7) en el suelo y finalmente el ultimo es el porcentaje de arena (Ecuación 8).

$$f_{csand} = \left(0.2 + 0.3 \left[-0.0256 * m_s * \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right) \text{ Ecuación 5}$$

$$f_{ci-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3} \text{ Ecuación 6}$$

$$f_{org} = \left[1 - \frac{0.25 f_{org}}{f_{org} + \exp(3.72 - 2.95 f_{org})} \right] \text{ Ecuación 7}$$

$$f_{hisand} = [1 - (0.70 * (1 - m_s/100)) / ((1 - m_s/100) + \exp(-5.51 + 22.9 * (1 + m_s/100)))] \text{ Ecuación 8}$$

Fuente: (Copernicus, 2019)

El factor de erosionabilidad también tiene unidades de medida en tm*h* ha/ MJ* cm*ha, correspondiendo a la cantidad de suelo erosionable en toneladas métricas por el evento de precipitación en función de la energía cinética, de acuerdo con las

características de los suelos y los porcentajes de composición de acuerdo con la clasificación de la FAO. Este factor junto con el de erosividad de la lluvia son los únicos con unidades de medidas y van a permitir la evaluación de la erosividad potencial y efectiva en unidades de tm/ha*año.

Factor LS: Longitud de la ladera (L) y pendiente (S):

Para obtener el factor LS, se tiene como insumo principal el DEM de la zona. Para iniciar se generó un mapa de pendientes el cual correspondería al valor de beta en la ecuación 10 propuesta por Foster, (1977). Una vez se tiene esta superficie se calcula F y posteriormente m con ayuda de las ecuaciones 9 y 10. De acuerdo con este raster se puede analizar las áreas más susceptibles a erosión.

$$m = \frac{F}{1 + F} \text{ Ecuación 9}$$

$$F = \frac{\sin \frac{\beta}{0.0896}}{3 * (\sin \beta)^{0.8} + 0.56} \text{ Ecuación 10}$$

Fuente:(Renard et al., 1997, p. 127)

Para poder aplicar la ecuación propuesta por Velázquez en 2008 quien tuvo como base la ecuación propuesta por Desmet y Gover (ecuación 11), fue necesario contar con el valor de m calculado anteriormente junto con las superficies de dirección y acumulación de flujo (A) del área para poner obtener el valor de longitud de la ladera. También es necesario tener en cuenta el tamaño del pixel (D) y como es una superficie raster el valor de x se considera como un valor de 1.

$$L_{(i,j)} = \frac{[A_{(i,j)} + D^2]^{(m+1)} - A_{(i,j)}^{(m+1)}}{x^m * D^{(m+2)} * 22.13^m} \text{ Ecuación 11}$$

Fuente: (Copernicus, 2019)

Para el cálculo de S se realiza la formula condicionada de McCool, quien propuso ecuaciones condicionadas. Si la tangente de beta es menor a 0.09 la formula a aplicar es la ecuación 12 y si es mayor o igual a 0.09 la ecuación correspondiente seria la ecuación 13. Finalmente se realiza el producto entre los raster de L y S para obtener el raster final del factor LS. La unidad de medida para este factor es adimensional.

$$S_{(i,j)} = 10.8 * \sin \beta_{(i,j)} + 0.03 \text{ Ecuación 12}$$

$$S_{(i,j)} = 16.8 * \sin \beta_{(i,j)} - 0.5 \text{ Ecuación 13}$$

Fuente:(Cortolima, 2007)

Factor C: cubierta vegetal:

Este factor disminuye la probabilidad de erosión de las áreas donde hay mayor cobertura del suelo por la presencia de la vegetación; Sin embargo, para el caso de

los suelos descubiertos, aumenta la probabilidad de pérdida de suelo en estas áreas. Para este factor se utilizó la capa de coberturas de suelos a escala 1:100.000 de los dos departamentos obtenida de datos abiertos de la subdirección de agrología del IGAC.

El factor C se evalúa dependiendo del tipo de cobertura y de la cantidad de suelo cubierto por vegetación. El factor se puede calcular por medio de la fórmula propuesta por Dissmeyer y Foster, (1982) (Cortolima, 2007) quienes consideran además de los suelos desnudos, suelos con raíces, altura de dosel, coberturas y el contenido orgánico.

Por otro lado, existen otros métodos como el de Wischmeier y Smith, quienes clasifican otro tipo de coberturas más específicas como los bosques, paramos, humedales y diferentes tipos de cultivos (Wischmeier & Smith, 1978). De acuerdo con los tipos de coberturas existentes dentro del área de estudio para la presente investigación se utilizaron los valores obtenidos por medio de este último método.

Factor P: Prácticas de manejo:

Por último, las prácticas de manejo, solo se consideran cuando dentro del área de estudio existe algún manejo especial de los recursos con fines de conservación, por ende, para la presente investigación no se va a considerar ninguna practica de manejo. Por otro lado, como la ecuación USLE es la multiplicación de todos los factores se va a considerar este factor con un valor constante de 1.

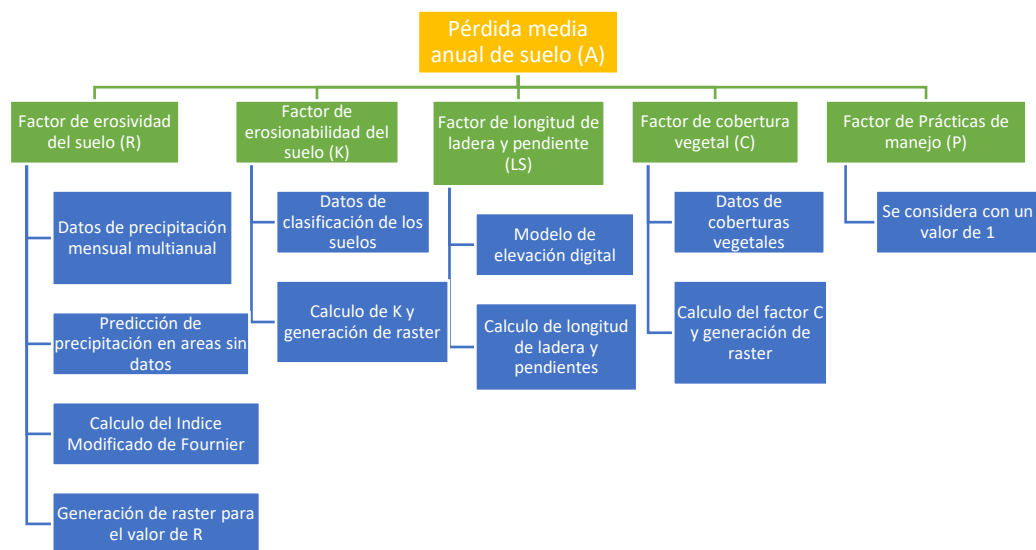


Imagen 2 Metodología para el cálculo de la ecuación USLE

2. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Antes de comenzar el análisis de los datos, se proyectaron las capas al sistema de coordenadas WGS84 UTM18. Además, fue necesario ajustar el tamaño del pixel de los raster generados en cada uno de los factores analizados a continuación.

De acuerdo con lo anterior se tomó como referencia el tamaño de pixel del DEM, el cual era de 30 metros, por ende, las superficies generadas por el modelo geoestadístico de kriging y los feature clases rasterizados se dejaron en un tamaño de celda de 30 metros, con la finalidad de no deteriorar el tamaño de pixel del resultado final y poder obtener una superficie continua con las áreas correspondientes a la erosión potencial y efectiva de los suelos en el área de estudio.

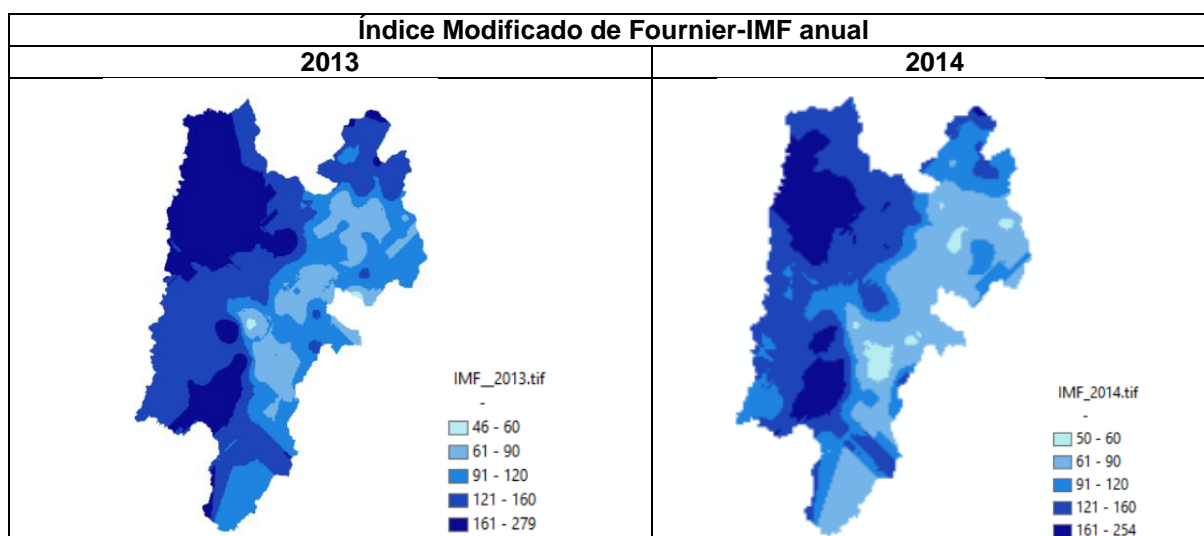
Para iniciar se realizó el análisis exploratorio para cada uno de los meses, antes de realizar las superficies de predicción por Kriging. Al realizar el histograma dentro del software se obtuvieron los datos de los valores estadísticos. Los parámetros tenidos en cuenta para el análisis fueron: skewness entre -0.5 a 0.5, curtosis entre 2.5 a 3.5 y el promedio entre la media y la mediana cercano a 1.

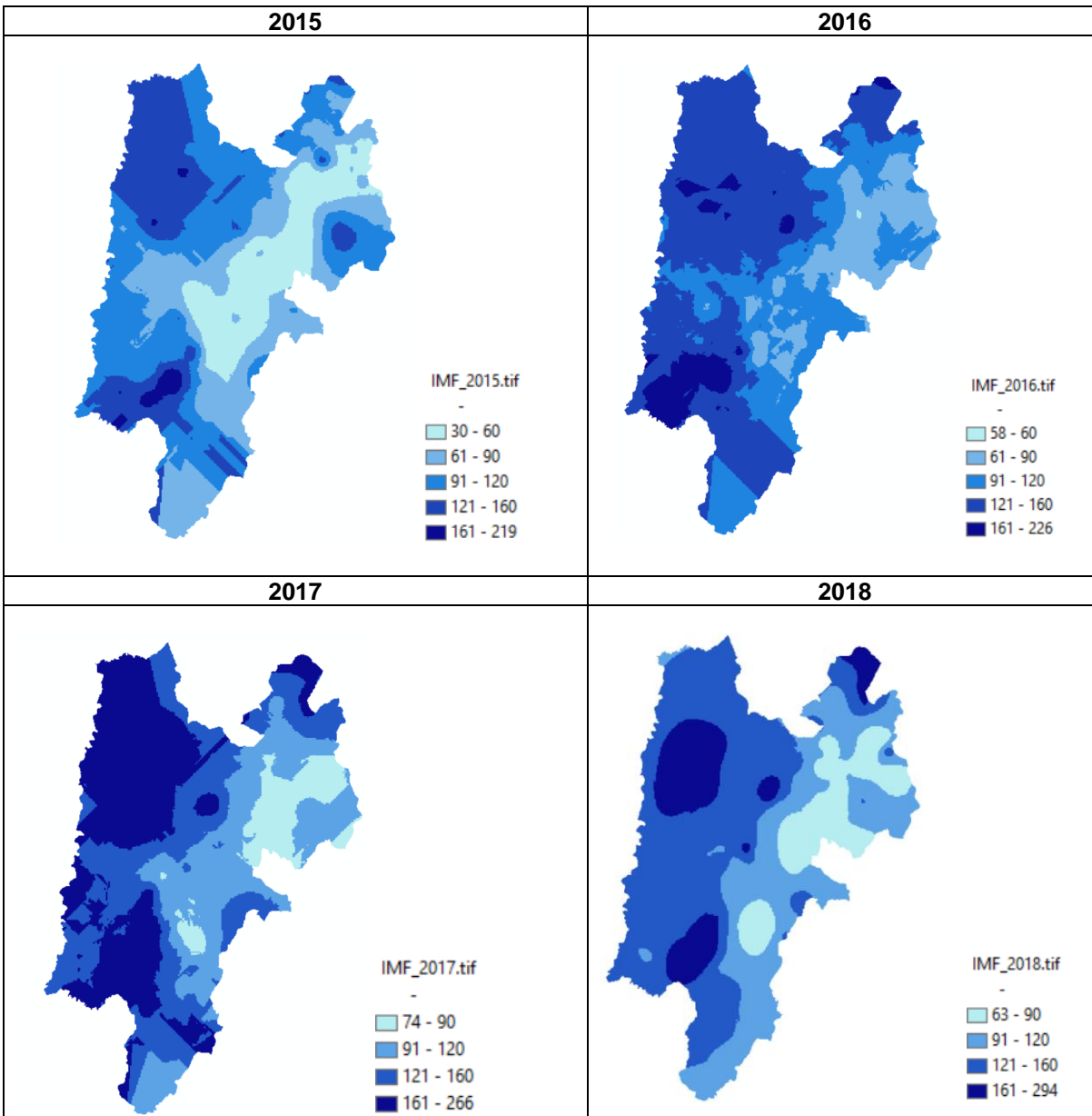
Cuando los datos no se encontraban dentro de estos rangos se realizó una transformación de los datos de tipo logarítmico o de box-cox. En tal caso no funcionara se realizó un diagrama de qqplot con el fin de verificar la presencia de valores extremos. En caso de haberlos y de encontrarse en una zona donde había muchos datos se eliminaba con el fin de obtener una superficie raster con menor error cuadrado.

Al calcular las superficies de predicción por el método de Kriging se generaron los mapas de voronoi para cada uno de los meses. El tipo de Kriging más cercano al mapa de voronoi fue el Kriging ordinario, además se optimizo el modelo con semivariograma y el tipo de modelo dependía de cual tuviera menor error con respecto a los datos.

Factor R: a partir de las superficies raster generadas para cada uno de los meses y años de los datos de la precipitación media mensual se calculó en IMF utilizando la ecuación 2 para cada uno de los años, obteniendo los resultados de la siguiente tabla:

Tabla 1 Valores del IMF en el área de jurisdicción de la CAR para los años 2013-2018





Para poder analizar y comparar los resultados obtenidos en los raster de la tabla 1, los cuales corresponden a los IMF de cada año, se clasificaron los valores teniendo como base la clasificación dada por la CEC, quienes clasifican estos resultados desde un índice de agresividad de precipitación muy bajo hasta muy alto.

De acuerdo con las clasificaciones de la tabla 2, para los años 2013, 2014, 2017 y 2018 predomina el IMF entre los rangos de 120 – 160 (alto) y >160 (muy alto), mientras que para el año 2016 la mayoría de las zonas dentro del área corresponden a una clasificación de alto y finalmente para el año 2015 predominan los índices clasificados en Bajo y muy bajo.

Por otro lado, se puede observar en cada uno de los años, que los índices de agresividad tienden a tener mayor influencia en la zona occidental del área de

estudio, por lo que el factor R tiende a tener mayor influencia por erosividad de la lluvia en estos municipios incrementando la perdida de los suelos.

La finalidad de seleccionar varios años es poder tener valores representativos para el análisis de la perdida de los suelos por erosión hídrica relacionada con eventos de precipitación. Según los resultados para el IMF de cada año, la clasificación predominante corresponde a un índice alto. Resultado que se puede observar en la imagen 3.

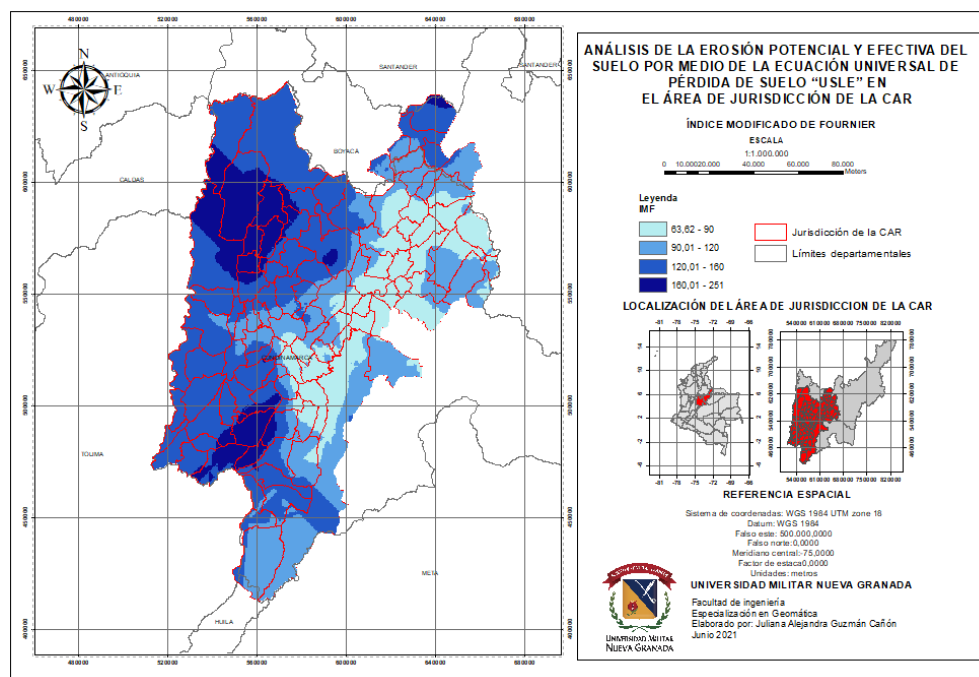


Imagen 3 IMF promedio de los años 2013-2018 en el área de jurisdicción de la CAR

Al igual que los resultados obtenidos en la tabla 1 se clasificaron los valores del IMF promedio de los 6 años de acuerdo con la tabla 2, adicionalmente se calcularon los porcentajes de las áreas ocupadas para cada una de estas clasificaciones.

Tabla 2 Clasificación del IMF con los porcentajes del área que ocupa el IMF promedio para el área de jurisdicción de la CAR

CLASE	RANGO	DESCRIPCION	Área (ha)	%
1	<60	Muy bajo	-	-
2	60-90	Bajo	803.7	18.73
3	90-120	Moderado	1172.52	27.33
4	120-160	Alto	1761.75	41.06
5	>160	Muy Alto	552.24	12.87

Adaptada de: (Echeverri Tafur & Obando Moncayo, 2010)

Aproximadamente el 54% de la zona de estudio se encuentra entre los rangos de alto y muy alto en el índice de erosividad. Estos valores están localizados al noroccidente y suroccidente comprendiendo los municipios de Saboya, Caparrapí, Guaduas, utica, La Palma, Topaípi, El Peñón, La Peña, Nimaima, Nocaima, Villeta,

Pacho, El colegio, Granada, Viotá, Silvania, Agua de Dios, Nilo, Tibacuy y Fusagasugá.

Por otro lado, las zonas donde hay una clasificación del índice en moderado, bajo y muy bajo es del 46% y se ubica al oriente del área de jurisdicción de la CAR, donde se encuentran los municipios de Soacha, Tequendama, Sibaté, Bojacá, Funza, Tenjo, Bogotá, Chía, Sopo, Tabio, Zipaquirá, Tocancipá, Guatavita, Gachancipá, Nemocón, Suesca, Tausa, Cucunuba, Sutatausa, Ubaté, lenguaque y villapinzon.

Después de haber realizado el cálculo del IMF promedio para los años 2013-2018 se calculó el factor R por medio de la ecuación 3, teniendo como resultado el raster de la imagen 4.

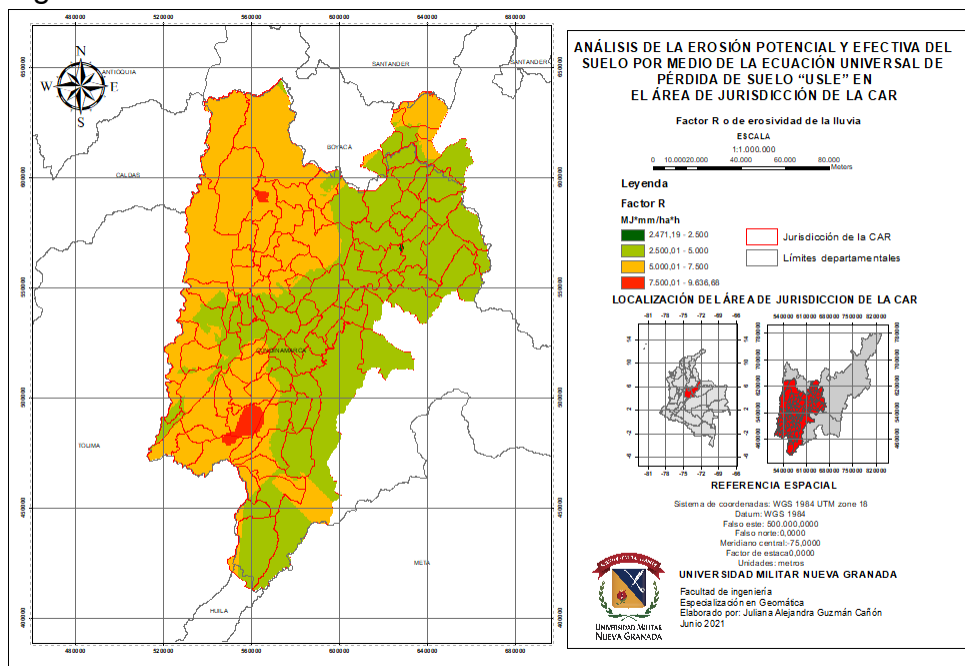


Imagen 4 Factor R o de erosividad de la lluvia para el periodo de 2013-2018

De acuerdo con los valores obtenidos en el factor de erosividad se analizaron por medio de la tabla 3. Los valores entre 5.000 a 7.500 MJ*mm/ha*h están clasificados como erosividad moderada; sin embargo el nivel máximo de erosividad de acuerdo con esta clasificación fue Alto, el cual corresponde al rango de 7.500-10.000 MJ*mm/ha*h. Para determinar las analizar el índice se reclasificaron los valores de acuerdo con los rangos propuestos por Rivera y Gómez, (1991), adaptados del método de Hudson (Echeverri Tafur & Obando Moncayo, 2010).

Tabla 3 Clasificación del factor R para el área de jurisdicción de la CAR

Clase	Erosividad R (MJ*mm*ha-1)	Clasificación	Área (ha)	%
1	<1.000	Natural	-	
2	1.000-2.500	Muy Baja	555.66	0.03
3	2.500-5.000	Baja	995481.81	53.11
4	5.000-7.500	Moderada	857650.32	45.75
5	7.500-10.000	Alta	20758.23	1.11

6	10.000-15.000	Muy Alta	-
7	15.000-20.000	Severa	-
8	>20.000	Extremadamente Severa	-

Adaptada de: (Echeverri Tafur & Obando Moncayo, 2010).

De acuerdo con el análisis de la tabla 3 la mayoría del área se encuentra dentro de una clasificación baja con un 53.11%, es decir, hay una baja probabilidad de erosión por precipitación en los municipios localizados en el área de color verde en la imagen 4.

Por otro lado, el área dentro del rango con clasificación de erosión moderada es del 45.75%, siendo casi el 50% del territorio y para una erosión alta esta el 1.11% del área. Estos valores se pueden ver de color naranja y rojo en la imagen 4. Esta última clasificación corresponde a los municipios de Saboya, La Palma, Viotá, Silvania y Nilo.

Factor K: el factor de erodibilidad está directamente relacionado con las características y composición de los suelos con respecto al efecto del agua sobre la superficie. Sirve para la evaluación de la probabilidad de los suelos ser erosionables. Para la obtención de los valores de K se utilizaron las ecuaciones de la 4 a la 8. Obteniendo el raster de la imagen 5.

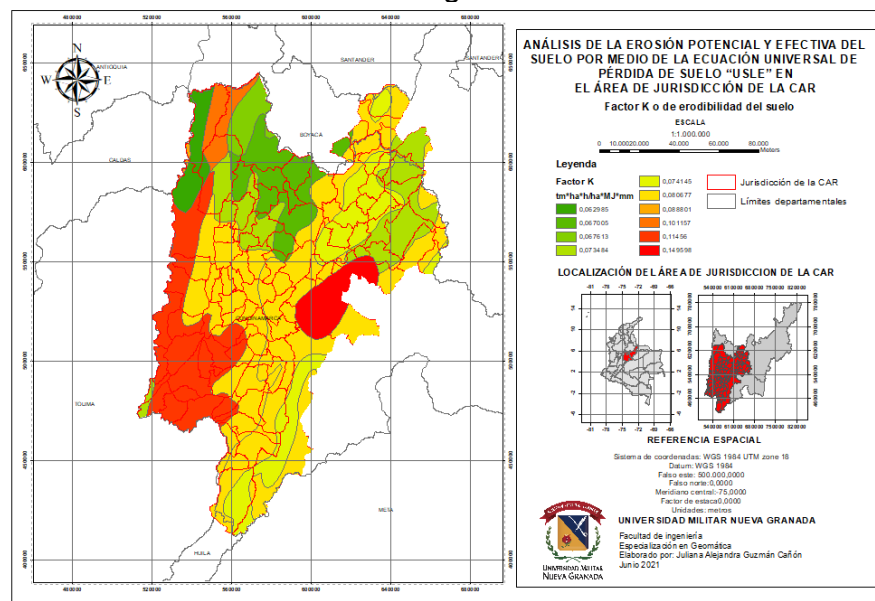


Imagen 5 Factor K de erodibilidad del suelo en el área de jurisdicción de la CAR

De acuerdo con los valores de los porcentajes de la composición del suelo dados por la FAO, entre mayor porcentaje tenga el suelo de arcilla o limo, hay una mayor probabilidad de erosión del suelo y por ende va a ser mayor el valor de K, de acuerdo con la imagen 5 este tipo de valores se pueden ver en las primeras 3 tonalidades de verde. De acuerdo con los valores de la FAO el porcentaje para cualquiera de los dos materiales se encuentran por encima del 40%.

Por otro lado, cuando la cantidad de arena está en mayor proporción a comparación del limo y la arcilla, el valor de K es menor o cercano a cero. Considerando los

porcentajes para los suelos identificados por la FAO, las áreas de color amarillo a rojo en la imagen 5 corresponde a los suelos donde la cantidad de arena varía entre el 53 al 70%. Además, los valores de limo y arcilla están entre el 10,5 y 30,6%. Según lo anterior para la mayoría de los resultados obtenidos en el factor K los suelos no son fácilmente erosionables.

Con la finalidad de conocer el área de cada uno de los valores del factor K se realizó la tabla 4. También se clasificaron los valores dependiendo del aporte para la erosión de los suelos por parte de este factor.

Tabla 4 Clasificación de la erodibilidad del suelo (Factor k) en el área de jurisdicción de la CAR

#	Erodibilidad ($tm*ha*h/ha*MJ*mm$)	Clasificación	Área (ha)	%
1	0.0629	Baja	56169,64	3,00
2	0.0670	Baja	163134,12	8,70
3	0.0676	Baja	45894,35	2,45
4	0.0734	Moderada	223361,36	11,92
5	0.0741	Moderada	222573,82	11,87
6	0.0806	Moderada	752627,85	40,15
7	0.0888	Alta	2370,30	0,13
8	0.1011	Alta	53165,70	2,84
9	0.1145	Alta	276904,83	14,77
10	0.1495	Muy alta	78214,33	4,17

De acuerdo con la tabla 4 el espacio ocupado por los suelos con factor K entre 0.0629 y 0.0888 $tm*ha*h/ha*MJ*mm$ es del 78%, es decir son suelos con menor porcentaje de contenido de arena y materia orgánica, siendo susceptibles a tener menor erodibilidad.

Respecto a los valores entre 0.1011 y 0.1495 $tm*ha*h/ha*MJ*mm$ ocupan el 21.78% y corresponden a suelos con mayor contenido de arcilla o limo. Estos dos materiales no tienen buena permeabilidad, propiedad del suelo relacionada con el espacio entre poros, los cuales van a permitir o no el paso del agua y nutrientes, disminuyendo la presencia de vegetación, aumentando la erodibilidad de los suelos.

Factor LS: Para evaluar la relación entre la pérdida de suelo en relación con la pendiente y a longitud del terreno, por medio del software se utilizó un DEM con el cual se calcularon los factores correspondientes para la ecuación de la 9 a la 13. Inicialmente se realizó el cálculo de beta, el cual corresponde a la pendiente, para lo cual se utilizó la herramienta de slope desde arctoolbox.

Seguido a esto se hace el cálculo de F y M por medio de la ecuación de la ecuación 9 y 10 para poder calcular la longitud de ladera (ecuación 11). De acuerdo con las variables de esta última ecuación se debe multiplicar el valor de beta por 0.01745 para realizar la conversión de unidades de grados a radianes, porque el software solo entiende las operaciones en radianes.

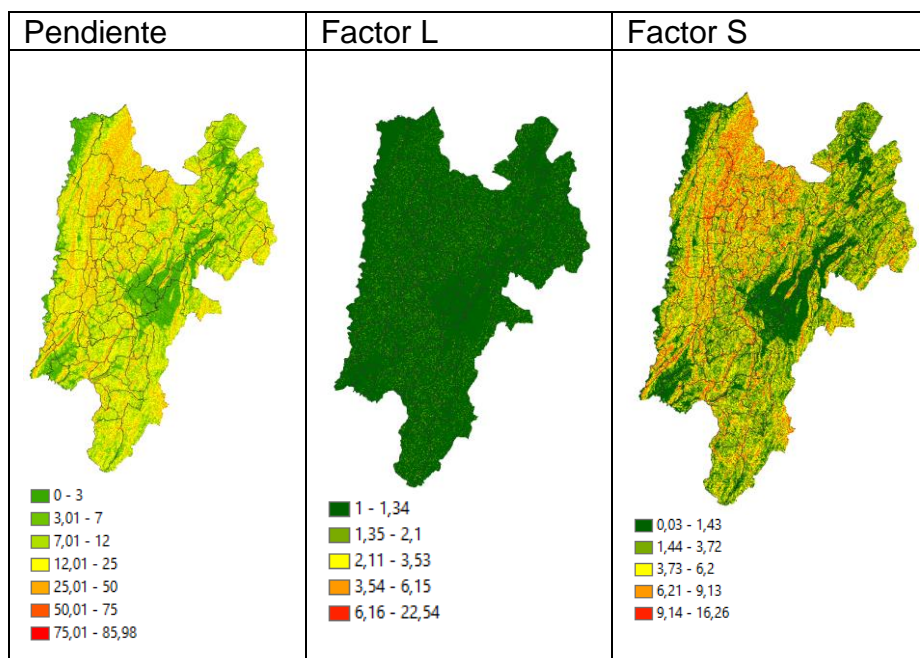
Con respecto a las otras variables, la acumulación de flujo (A) en la ecuación 11 se calcula por medio de la generación de un raster a partir de beta para la dirección del

flujo y desde este se obtiene la acumulación del flujo. D es el tamaño del pixel del DEM de 30 metros y X es el coeficiente de forma, donde en sistemas pixelados se considera con un valor de 1.

Por otro lado, para la obtención del factor S o la pendiente se utilizó la ecuación 12 y 13. Este factor depende de los valores de la tangente de las pendientes en cada parte de la superficie si son mayores iguales o menores a 0.09 de acuerdo con la ecuación propuesta por McCool.

En la mayoría de las investigaciones se utiliza la ecuación de Wischmeier y Smith; pero, esta se maneja para terrenos con pendientes uniformes, el cual no es el caso para el área de la jurisdicción de la CAR. Es por lo anterior, la razón por la cual se utilizó la ecuación propuesta por McCool la cual considera pendientes entre 20%, 30%, 40% o mayores, además no necesariamente las pendientes deben ser uniformes.

Tabla 5 Resultados de la pendiente, Factor L y Factor S para el área de jurisdicción de la CAR



De acuerdo con la tabla 5, las pendientes generadas a partir del modelo de elevación-DEM van desde 0 hasta 86 grados, siendo las áreas de 0-3 una superficie muy plana, la de 3 -7 plano, 7-12 casi plano de 12-25 ondulado, 25-50 muy ondulado de 50-75 escarpado y mayor a 75 muy escarpado (Cortolima, 2007). Las áreas con pendientes entre 25 a 86 son las pendientes con mayor probabilidad de erosión.

Para saber cuáles son las pendientes predominantes en el área de estudio se reclasificaron los valores para las pendientes en la tabla 6 de acuerdo con la erosión teniendo en cuenta la pendiente y la longitud (Adolphe et al., 2017).

Tabla 6 Clasificación de las pendientes de acuerdo con la probabilidad de erosión en el área de jurisdicción de la CAR.

% Pendiente	Probabilidad de erosión	Área (ha)	%
0 - 3	Muy Baja	578446.2	14.32
3.1 - 7	Baja	1322649.9	32.75
7.1 - 20	Media	946778.3	23.44
20.1 - 35	Alta	929551.5	23.01
>35	Muy alta	261812.4	6.48

De acuerdo con la tabla 6, el 47% se encuentra en un tipo de erosión muy baja y baja. El 23.4% tiene una probabilidad media y el 29.6% del área se encuentra en una clasificación de probabilidad alta y muy alta, las pendientes son de tipo muy ondulado a muy escarpado desde 25 hasta 86% de pendiente.

De acuerdo con los resultados del factor L (Tabla 5) la longitud de las pendientes no es muy extensa obteniendo una mayor cantidad de área dentro del rango de 1 - 1.34. De acuerdo con la metodología propuesta por McCool, cuando los valores de la longitud tienden a ser pequeños, la erosión es menor a pesar de tener una pendiente mayor a 35.

Respecto a los resultados obtenidos para el factor S (tabla 5) correspondiente a la erosión por arrastre físico debido a la pendiente del terreno, se analizaron las pendientes dependiendo de la tangente de beta al ser menor o mayor igual a 0.09, de acuerdo con la ecuación condicional (Ecuación 12 y13). La erosión dada por este factor, de acuerdo con McCool también va a depender del tipo de cobertura, debido a que la vegetación, y/o la presencia de áreas radicales disminuye la probabilidad de perdida de suelo.

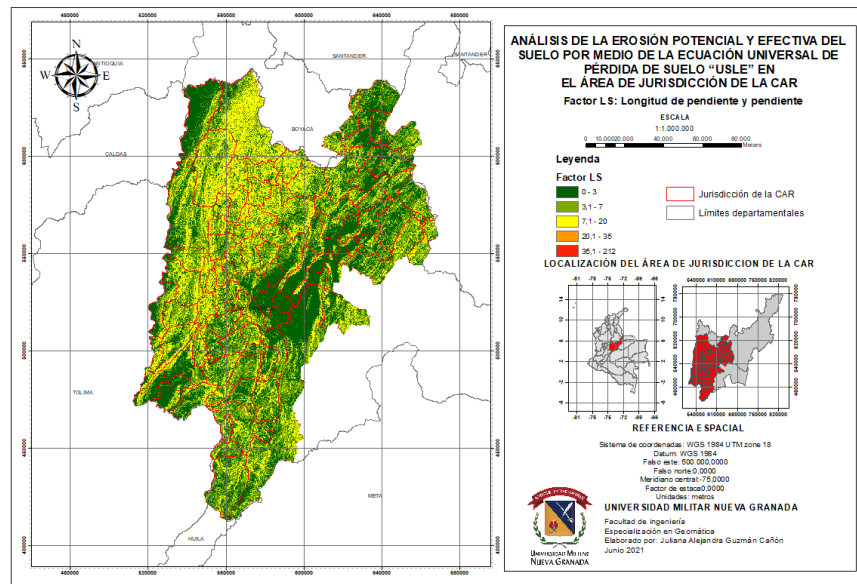


Imagen 6 Factor LS para el área dentro de la jurisdicción de la CAR.

De acuerdo con la Imagen 6 Las zonas donde hay mayor influencia por parte del de este factor topográfico son aquellas dentro de las cuencas hidrográficas del Río

Negro, Río Minero y el Río Bogotá. Con la finalidad de poder analizar el factor LS se realizó la tabla 7.

Tabla 7 Clasificación del factor LS de acuerdo con el valor de las pendientes.

% Pendiente	Factor LS	Área (ha)	%
0 - 3	0 - 3	1611705,42	39,93
3.1 - 7	3.1 - 7	1335988,08	33,10
7.1 - 20	7.1 - 20	1082715,39	26,82
20.1 - 35	20.1 - 35	5716,8	0,14
>35	35.1 - 212	664,56	0,02

De acuerdo con la tabla 7 el área dentro del rango más alto del factor corresponde al 0.02%, por otro lado, donde las pendientes van de 0 a 20 se encuentra el 99.85% del área de estudio, haciendo el factor LS o topográfico poco representativo respecto a la influencia frente a la pérdida de los suelos; sin embargo si afecta a partes muy específicas de algunos de los municipios de la región.

Factor C: de acuerdo con las coberturas del área de jurisdicción de la CAR obtenida de la base de datos del IGAC se clasificaron los suelos de acuerdo con la metodología de Wischmeier y Smith, (1978).

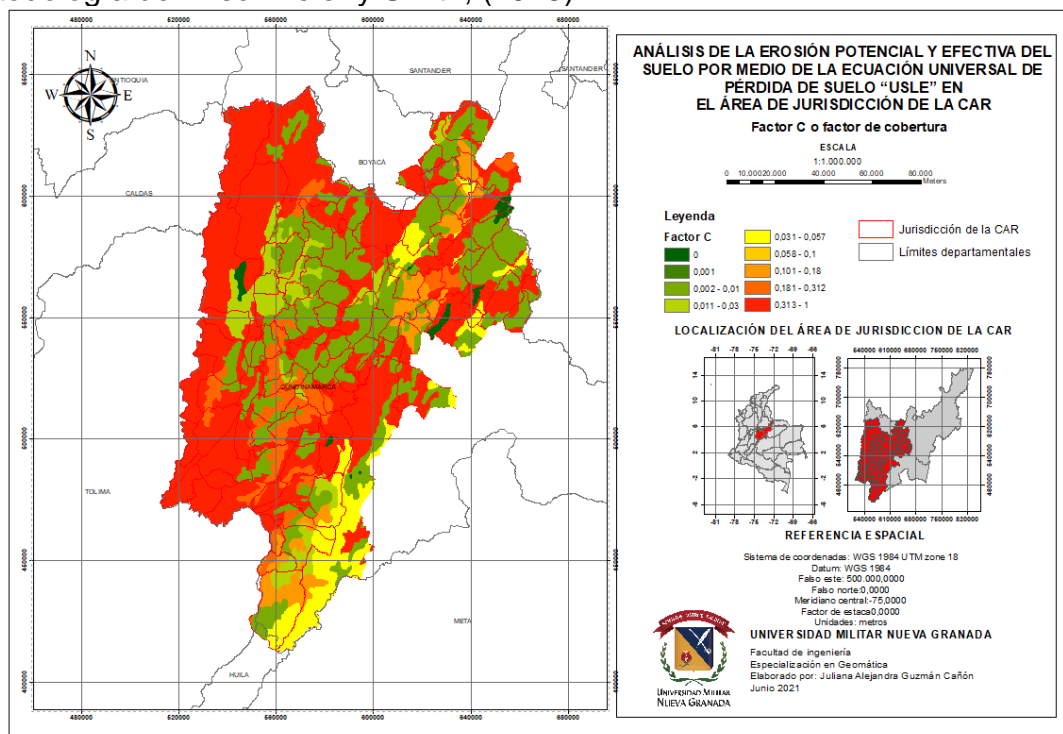


Imagen 7 Factor C o de cobertura para el área dentro de la jurisdicción de la CAR

Los valores obtenidos para el factor C como se ve en la imagen 8, varían entre 0.001 y 1. De acuerdo con la clasificación, entre mayor cantidad de vegetación haya, los valores son cercanos a cero disminuyendo la probabilidad de erosión del suelo, pero cuando el suelo está descubierto los valores tienden a 1. Los tipos de cobertura identificados dentro del área de estudio son las siguientes:

Tabla 8 Factor C de acuerdo con el tipo de coberturas en el área de jurisdicción de la CAR.

<i>Tipo de cobertura</i>	<i>Factor C</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>%</i>
<i>Cultivos mixtos</i>	0.001	488142.7	26.32
<i>Bosque altoandino seco</i>	0.0034	38494.3	2.08
<i>Planicie sedimentaria</i>	0.01	11457.8	0.62
<i>Cultivo de caña</i>	0.0136	68750.5	3.71
<i>Bosque altoandino seco de roble</i>	0.03	41712.8	2.25
<i>Humedales</i>	0.04	4168.3	0.22
<i>Paramos húmedos</i>	0.0574	135056.3	7.28
<i>pastos</i>	0.1	96072.1	5.18
<i>Cultivo de café</i>	0.18	92604.6	4.99
<i>Matorrales</i>	0.25	27755.3	1.50
<i>Cultivo de soya, sorgo, algodón</i>	0.312	40754.4	2.20
<i>Suelos desnudos</i>	1	810001.1	43.67

De acuerdo con la tabla 8 las superficies donde el factor C es menor suelen ser aquellas donde hay vegetación de tipo de bosque, ya sea natural, plantado, rastrojo, caña y de paramo, debido a la buena cobertura vegetal de la superficie.

Respecto a los valores más altos para el factor C ocupan un 43.67% del área suelos desnudos. Como los valores del factor C van de 0 a 1, siendo 1 es valor más alto, las zonas dentro de esta clasificación van a aumentar la probabilidad de pérdida de suelos, observada en el análisis de la erosión potencial y efectiva por medio de la ecuación principal (Ecuación 1).

Tal y como se ve en la imagen 7 donde el Factor C es cercano a 1 o igual corresponde a superficies como asentamientos urbanos, suelos desnudos, áreas donde la vegetación ha sido modificada o diferentes tipos de cultivos los cuales requieren del arado del suelo como cultivos de tubérculos, zanahoria, trigo, remolacha, ajo, entre otros.

Por otro lado, Respecto al 54.12% restante, corresponde a las áreas donde hay presencia de coberturas vegetales ayudando a mitigar la erosión de los suelos y por ende la pérdida del recurso ya sea por medio de eventos de precipitación o por las características morfológicas del terreno.

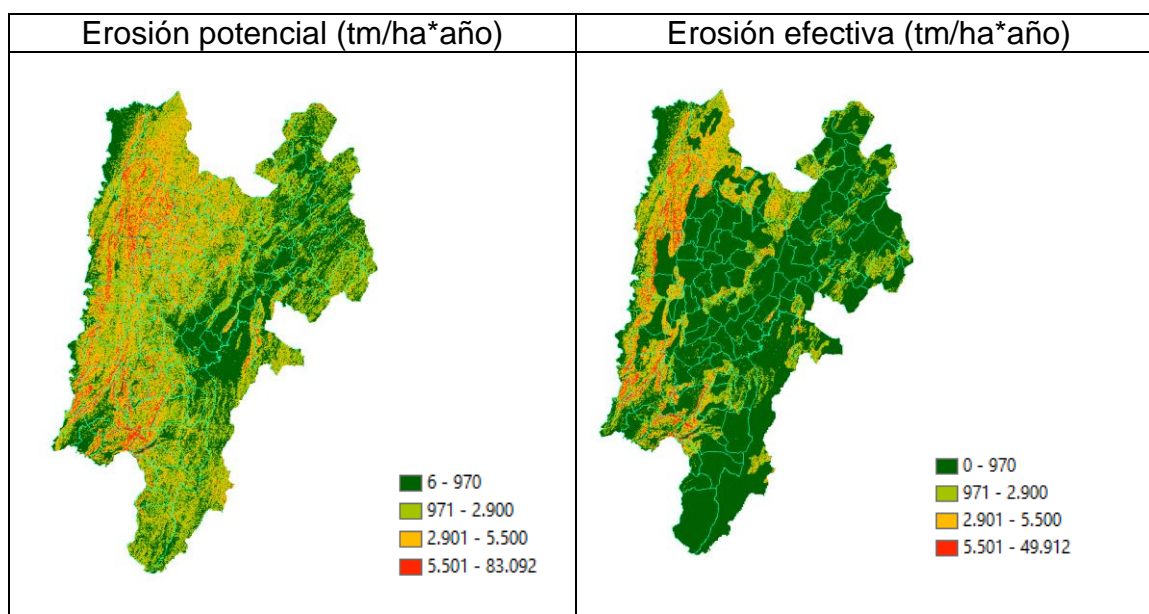
Factor P: es el factor se usa para evaluar el impacto de las prácticas de protección contra la erosión del suelo, tales como desarrollo de cultivos en contornos, terrazas, fajas, etc. (Cortolima, 2007). Debido a la amplitud del área seleccionada para esta investigación y no se tuvieron en cuenta si se realizaban o no prácticas de conservación, por ende, de acuerdo con algunas investigaciones para este caso el factor P se toma con un valor de 1 (Röder et al., 2006).

Estimación de la erosión potencial y efectiva por medio de la ecuación USLE:

De acuerdo con la ecuación 1, haciendo uso de los factores calculados y evaluados anteriormente se realizó el cálculo tanto de la erosión potencial como de la efectiva. La primera corresponde a la multiplicación de los 3 factores activos correspondientes al factor R, K y LS, con el fin de estimar la erosión anual sin considerar los factores atemperantes. La segunda es la erosión existente teniendo

en cuenta los factores de C y P, es decir las coberturas del suelo y las prácticas de manejo.

Tabla 9 Erosión potencial y efectiva del área de estudio dentro de la jurisdicción de la CAR



Las dos superficies raster generadas para el análisis de la erosión potencial y efectiva observadas en la tabla 9 muestran la diferencia entre la pérdida de suelos sin la presencia de cobertura vegetal y con esta. Si se observan los valores en los rangos, son mayores para la erosión potencial siendo casi el doble de lo obtenido en la erosión efectiva.

La estimación anual de la erosión (tm/ha*año), hace referencia a la cantidad de suelo perdido en toneladas métricas por hectárea erosionados al año. Para esta investigación se consideró el valor promedio de 6 años de precipitación media mensual.

Tabla 10 Pérdida del suelo anual evaluada para la erosión potencial y efectiva durante los años 2013-2018 en el área de jurisdicción de la CAR.

Pérdida de suelo		Erosión potencial (tm/ha*año)		Erosión efectiva (tm/ha*año)	
Clasificación	rango	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Muy bajo	0 -970	653.483,52	35,15	1.307.915,1	70,35
Bajo	970 – 2900	767.992,14	41,31	316.852,02	17,04
Moderado	2.900 – 5.500	362.812,86	19,51	186.125,67	10,01
Alto	5.500 – 83.100	74.957,85	4,03	48.189,6	2,59

Para el análisis de los dos tipos de erosión se reclasificaron los valores para analizar cualitativa y cuantitativamente los valores obtenidos para la pérdida de suelo por medio de la ecuación USLE. Los rangos se seleccionaron teniendo en cuenta los

valores obtenidos en para cada uno de los factores especialmente el de la erosividad (Factor R), debido a su aporte para un mayor puntaje dentro de la ecuación de USLE por el método seleccionado para su cálculo.

De acuerdo con la clasificación de la tabla 10 la pérdida de suelos se reduce considerablemente teniendo en cuenta el factor de cobertura (erosión efectiva). Los porcentajes del área con pérdida de suelo en la clasificación de muy bajo pasaron de 35,2% a un 70%, es decir aumentó en un 50% las zonas con mínima afectación.

Respecto a los porcentajes dentro de la clasificación de pérdida de suelo moderado, la erosión potencial ocupó el 19.5% del área de estudio, mientras tanto para la erosión efectiva paso a ser del 10% reduciendo considerablemente las zonas dentro de esta clasificación.

Finalmente, para la clasificación de alto en la pérdida de suelo el porcentaje del área para la erosión potencial fue del 4% y paso a la erosión efectiva a ser del 2,6%. Este último corresponde a los municipios de Tibacuy, Nilo, Arbeláez, Pandi, Fusagasugá, Viotá, El Colegio, Tocaima, Apulo, Anapoima, Ricaurte, Agua de Dios, Girardot, Nariño, Guataquí, Jerusalén, Beltrán, Pulí, Quipile, San Juan de Rio Seco, Chaguaní, Villeta, Guaduas, Quebrada Negra, Puerto Salgar Caparrapí, Yacopí, La Palma, Topaípi, Pacho, San Cayetano, la Vega, Albán, Cota, Bogotá, Saboya y Buenavista.

3. CONCLUSIONES

- A pesar de que el 53.93% del área tiene un IMF clasificado con agresividad alta y muy alta, solo el 1.11% del área tiene un factor de erosividad de la lluvia entre 7,500 a 10,000 clasificado como erosividad muy alta. Mientras que más de la mitad del área con 53,11% está en erosividad baja y el 45,75% está en erosividad moderada.
- El tipo de pendiente predominante va de muy plano a plano con una ocupación del 32% del total del área, siendo las zonas menos afectadas por este factor, por otro lado, las pendientes superiores al 35% con probabilidad de erosión alta ocupan el 6,5%. Debido a lo anterior solo el 0.02% del área se ve mayormente erosionado por el factor LS con un factor entre 35 a 212.
- Los factores con mayor influencia para los valores obtenidos en la erosión potencial fueron el factor de erosividad de la lluvia (R) por tener el 45.75% del área clasificada como erosión moderada (5.000 -7.500) y el factor de erosionabilidad del suelo (K) por tener el 63.94% del área (0.0734 - 0.0806 $\text{tm}^*\text{ha}^*\text{h}/\text{ha}^*\text{MJ}^*\text{mm}$) dentro de una erodibilidad moderada y un 17.74% en erodibilidad alta (0.0888 – 0.1145 $\text{tm}^*\text{ha}^*\text{h}/\text{ha}^*\text{MJ}^*\text{mm}$) y un 4.117% en erodibilidad muy alta (0.1495 $\text{tm}^*\text{ha}^*\text{h}/\text{ha}^*\text{MJ}^*\text{mm}$).
- Para los resultados obtenidos en la erosión efectiva, el factor C, mitigó en gran medida el efecto de la precipitación en los suelos. A pesar de ser atemperante, el 43,67% del área obtuvo un valor de 1 correspondiente a suelos desnudos.
- La pérdida de suelo analizada desde la erosión efectiva puede llegar hasta 49.913 $\text{tm}/\text{ha}^*\text{año}$ en el área de jurisdicción de la CAR, pérdida atribuida a

las zonas fácilmente erosionables por efecto de los eventos de precipitación; sin embargo, solo 2.59% del área se encuentra dentro de esta clasificación.

- De acuerdo con los resultados obtenidos en la erosión efectiva las zonas con mayor pérdida de suelos se encuentran relacionadas con las cuencas hidrográficas de primer orden del Río Sumapaz, Bogotá, Magdalena, Negro y Minero.
- Finalmente, el uso de las herramientas SIG facilitan el análisis de la información, debido a la disminución de los tiempos para la obtención de los resultados, a partir de una gran cantidad de datos, no solo mejorando los procesos de investigación, sino que también la obtención de resultados para realizar procesos de planificación territorial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adolphe, K., Guardado Lacab, R., & Viltres Milán, Y. (2017). Cartografía de la peligrosidad por erosión hídrica en la ciudad de Brazzaville. *Minería y Geología*, 33(2).
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1993-80122017000200002&lng=es&nrm=iso
- Benayas Polo, R. (2019, March 8). *Índice de erosividad de la lluvia con ArcGIS*. GEASIG.
<https://www.geasig.com/indice-de-erosividad-de-la-lluvia-con-arcgis/>
- CAR. (2020). *Jurisdicción CAR*. <https://www.car.gov.co/vercontenido/7>
- Chirinos, L. R., & Mallaqui, C. G. (2016). Comparación entre Interpoladores Espaciales en el Estudio de Distribución de Partículas Sedimentables Insolubles en la Cuenca Atmosférica de Lima y Callao. *Información Tecnológica*, 27(4). <https://doi.org/0718-0764>
- Copernicus. (2019). *Supplementary materials for the manuscript: "A systematic assessment of uncertainties in large scale soil loss estimation from different representations of USLE input factors-A case study for Kenya and Uganda."* <https://hess.copernicus.org/preprints/hess-2019-602/hess-2019-602-supplement.pdf>
- Cortolima. (2007). *Pérdida de suelos en la cuenca del río Totare*.
https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/pom_totare/diagnostico/m_212perdida_de_suelos_totare.pdf
- Echeverri Tafur, L., & Obando Moncayo, F. H. (2010). Erosividad de las Lluvias en la Región Centro-Sur del Departamento de Caldas, Colombia. *Revista Facultad Nacional Agronomía*, 1(62).
<http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v63n1/a09v63n01.pdf>
- GIS Geography. (2020). *Inverse Distance Weighting (IDW) interpolacion*.
<https://gisgeography.com/inverse-distance-weighting-idw-interpolation/>
- GIS Geography. (2021). *Kriging Interpolation – The Prediction Is Strong in this One*.
<https://gisgeography.com/kriging-interpolation-prediction/>
- IDEAM. (2015). *Degradación de suelos*. SIAC. <http://www.siac.gov.co/erosion>
- Lince Salazar, L. A., Castaño Castaño, W. A., Castro Quintero, A. F., & Torres Angarita, F. A. (2016). Erosividad de la lluvia en la región cafetera de Risaralda, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 7, 37–45. <https://doi.org/10.22490/21456453.1548>
- Política para la gestión sostenible del suelo, 94 (2016).

http://www.andi.com.co/Uploads/Política_para_la_gestión_sostenible_del_suelo_FINAL.pdf

- Murillo, D., Ortega, I., Carrillo, J. D., Pardo, A., & Rendón, J. (2012). Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos. *Ing. USBMed*, 3(1), 2027–5846.
- Neira Acosta, A. S., & Alba Ostos, F. J. (2015). *Identificación y Evaluación de los escenarios de amenaza por sequía en el municipio de Guataquí- Cundinamarca* [Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas].
<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/7862/NeiraAcostaAlvarosteve2019.pdf;jsessionid=772673C625A3C2507016DB512813B0BD?sequence=1>
- Prado Wildner, L. do, & Veiga, M. da. (2006). *Erosión y pérdida de fertilidad del Suelo*.
<http://www.fao.org/3/t2351s/T2351S06.htm>
- Ramírez-Ortiz, F. A., Hincapié-Gómez, ; Edgar, Sadeghian-Khalajabadi, S., & Pérez-Gómez, U. (2007). Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central y occidental del departamento de Caldas. *40 Cenicafe*, 58(1), 40–52.
<https://www.cenicafe.org/es/publications/arc058%2801%29040-052.pdf>
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)* (703rd ed.). Agriculture Handbook Number 703.
https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/64080530/rusle/ah_703.pdf
- Röder, J., Gracia Villavicencio, R., & Villaseñor Zarazúa, P. (2006). Aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo “USLE” en SIG para estimar riesgo potencial de erosión en el área protegida “Sierra de Quila.” *Avances En La Investigación Científica En El CUCBA*, 156–162.
https://www.researchgate.net/publication/272476834_Aplicacion_de_la_ecuacion_universal_de_perdida_de_suelo_USLE_en_SIG_para_estimar_riesgo_potencial_de_erosion_en_el_area_protegida_Sierra_de_Quila
- Rodriguez, M. F., Florentino, A., Gallardo, J., & Antonio García, R. (2004). Sistemas de Inmación geográfica en la evaluación de la erosión hídrica en badajoz-españa aplicando la metodología usle. *Agronomía Tropical*, 54(4).
http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2004000400003
- UNGRD. (2017). *Estrategias de perspectivas estacionales de sequía para tomar decisiones apropiadas y oportunas en el campo de la agricultura y los recursos hídricos*.
<https://doi.org/978-958-56478-1-7>
- UNGRD. (2018). Atlas de Riesgo de Colombia: revelando los desastres latentes. *Unidad Nacional Para La Gestión Del Riesgo de Desastres*, 269.
<https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/27179>
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting Rainfall erosion Losses A Guide to Conservation Planning* (282nd ed., Vol. 537). U.S Department of Agriculture.
<https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>